第46卷 第4期
2023年4月
干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY
Vol. 46 No. 4
Apr. 2023

新疆巴州北部冬半年降水相态气象因子特征和判识指标分析

仇会民[1]， 万 瑜[2]， 张仕明[1]， 肖莲媛[3]， 周雪英[1]， 温 春[1]， 蒋聚金[4]

（1. 新疆巴州气象局，新疆 库尔勒 841000；2. 新疆维吾尔自治区气象台，新疆 乌鲁木齐 830002；3. 新疆若羌县气象局，新疆 若羌县 841800；4. 新疆库尔勒市人工影响天气办公室，新疆 库尔勒 841000）

摘 要： 利用1961—2018年10月至次年4月新疆巴音郭楞蒙古自治州(巴州)北部6个国家观测站的天气现象资料，统计分析近58 a降雨、降雪、雨夹雪、雨转雪4种降水相态的气候特征，得出巴州北部10月和4月以降雨为主，12月和1月以降雪为主，雨夹雪和雨转雪主要在11月和3月。利用2003—2018年10月至次年4月库尔勒站探空资料，得到与降水相态转换关系密切的10种物理量，量化了降水相态判识特征及指标。结果表明：(1) 地面最低温度、近地层温度、850 hPa温度、500~850 hPa之间的位势厚度、700~850 hPa之间的位势厚度、0 ℃层高度可将4种降水相态完全判别，500~850 hPa之间的温差、700~850 hPa之间的温差能有效判别降雨、降雪、雨夹雪。(2) 构建了降水相态预报评分办法，库尉轮平原和焉耆盆地的综合指标准确率达92.06%和94.36%，综合判定后预报评分达93.58%。(3) 特性层温度及温差对降雨和降雪的预报效果好于雨夹雪；位势高度及厚度对降雪的预报效果好于降雨和雨夹雪；位势厚度对雨转雪的预报效果要好于特性层温度。研究降水相态综合判据对巴州北部降水相态的判别有很好的参考价值，为提高雨雪相态转换预报准确率提供科学依据。

关 键 词： 降水相态；雨转雪；判别指标；检验；巴州北部

文章编号： 1000－6060(2023)04－0563－11(0563～0573)

降水由于其相态的多变性，一直受到气象工作者的广泛关注，相同降水量不同降水相态造成的影响差别很大[1-4]，降水相态的预报也是困扰预报员的难题之一。近年来国内、外气象工作者对冬季降水相态转变过程有较多的研究，并提出了识别判据。国外学者比较多的使用位势厚度和温度厚度判别降水相态[5-7]。国内学者早期主要利用特性层上的温度来判别降水相态，如李江波等[8]研究发现，当0 ℃层高度降到950 hPa以下、地面温度在0 ℃左右、925 hPa温度≤-2 ℃、1000 hPa温度≤2 ℃，降水相态由雨转雨夹雪转雪；高松影等[9]指出，850 hPa温度的0 ℃线能较好区分雨和雪区的大致范围，925 hPa温度的0 ℃线能较好地区分雨夹雪和雪以及雨夹雪和雨的大致范围。随着对降水相态的深入研究，位势厚度要比使用单层的温度更能表征出整层的冷暖状况，因此位势厚度也逐渐被国内学者采用，如漆梁波等[10]采用700~1000 hPa之间的位势厚度($H_{700\sim1000}$)、850~1000 hPa之间的位势厚度($H_{850\sim1000}$)、700~850 hPa之间的位势厚度($H_{700\sim850}$)及925 hPa温度(T_{925})，以单个判据和混合判据的方式，建立了雨、雪、雨夹雪和冻雨(冰粒)的降水相态识别判据。王洪霞等[11]通过研究复杂地形条件下的降水相态，得出了不同海拔高度的降水相态指标。高婧等[12]研究发现，塔城地区的降水相态与经度呈负相关，与

收稿日期： 2022-07-07； **修订日期：** 2022-09-15

基金项目： 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0102)；国家重点研发计划“重大自然灾害监测预警与防范”专项(2019YFC1510501)；新疆气象局面上项目(MS202015)；中亚大气科学研究基金项目(CASS201722)资助

作者简介： 仇会民(1990-)，男，工程师，主要从事短期天气预报等方面的研究. E-mail: 773412275@qq.com

通讯作者： 张仕明(1975-)，男，高级工程师，主要从事农业气象及灾害性天气的研究. E-mail: zsm911@163.com

纬度呈正相关，与海拔高度相关性不明显。诸多学者[13-16]为了检验降水相态指标对实际降水相态预报的指示意义，利用综合判据对降水相态检验的准确率达到了67.0%~90.9%，为实际业务工作提供了参考。

而在新疆基于降水相态预报指标的研究相对较少，仅张俊兰等[17]总结出新疆北疆地区春季降水相态转换的关键因子和指标，但未找出雨雪转换的临界指标。而不同地区的降水相态判据的使用、阈值范围都有很大的不同，新疆巴音郭楞蒙古自治州（简称巴州）北部地形复杂，具有独特的气候特点，降水相态也有其特定的阈值范围，但未进行过指标性提炼。本文综合考虑影响降水相态的各项因子，得到了降水相态的预报指标及雨雪转换临界指标，为巴州北部的降水相态预报提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

天山山脉横亘新疆中部，把新疆分为南北两部分，天山以北为准噶尔盆地，天山以南为塔里木盆地，巴州北部位于天山南坡，地形复杂，代表站有轮台站、库尔勒站、尉犁站、和静站、和硕站、焉耆站。和静县北部为天山山脉中部，焉耆县西部为霍拉山，和硕县南部为库鲁克塔格山，和静县、和硕县、焉耆县被山脉围绕，称之为焉耆盆地；库尔勒市、轮台县、尉犁县的南部为塔克拉玛干沙漠，北部和焉耆盆地被霍拉山和库鲁克塔格山相隔，称之为库尉轮平原。受库鲁克塔格山和霍拉山地形的影响，焉耆盆地与库尉轮平原之间的气候也有差异，本文将识别判据分为两类地区进行研究，焉耆站、和静站、和硕站为一类，为焉耆盆地；库尔勒站、轮台站、尉犁站为一类，为库尉轮平原（图1）。巴州北部库尔勒站为探空站，库尔勒站与其余5个代表站的直线距离在50~140 km，且海拔高度相近，因此库尔勒站在垂直方向上的观测资料也能够代表其余5个代表站上空的气象要素变化。

1.2 资料选取

选取1961—2018年10月至次年4月库尔勒站、轮台站、尉犁站、和静站、和硕站、焉耆站6站地面资料中的逐日天气现象，统计不同降水相态的气候特征。高空资料来源于2003—2018年库尔勒站（站号51656）逐日08:00和20:00（北京时间，下同）2个时次的探空资料。选取了2019—2021年10月至次年4月降水过程进行识别判据检验。

1.3 统计方法

降水相态的气候特征分析中，将降水相态分为降雨、降雪、雨夹雪、雨转雪，天气现象中出现雪、米雪、阵雪且无相态转化时，就将其统计为降雪日；仅有毛毛雨、阵雨、降雨时，统计为降雨日；一天中出现了雨夹雪或雨夹雪转雪或雪转雨夹雪时，统计为雨夹雪日；一天中出现了雨转雨夹雪或雨转雪或雨转雨夹雪转雪时，统计为雨转雪日。表1给出了各观测站点不同相态降水的统计日数。

探空资料时间选择：纯雨、纯雪及纯雨夹雪时

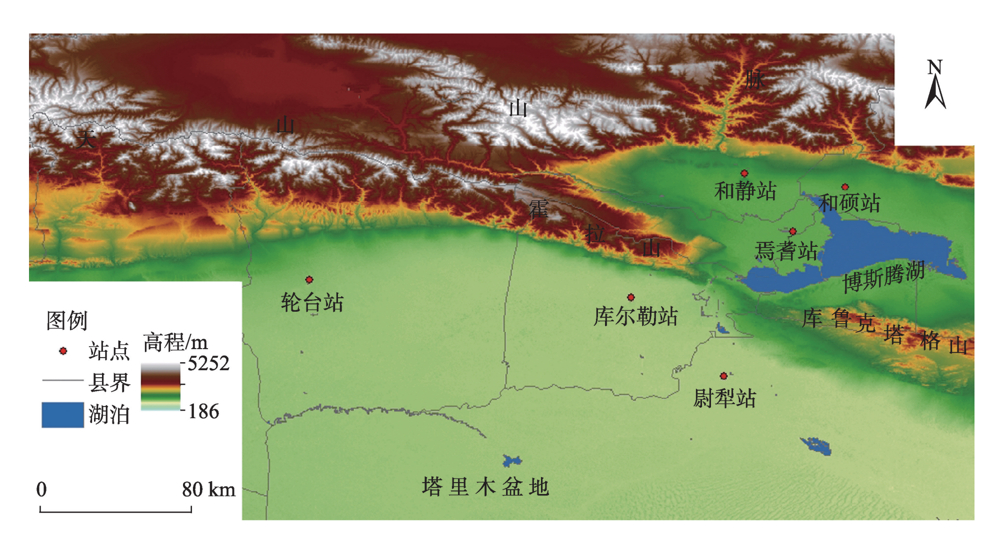


图1 研究区气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the study area

表1　1961—2018年10月至次年4月代表站不同相态降水日数

Tab. 1　Number of precipitation days in different phases at representative stations from October to April in next year between 1961 and 2018

/d

类型	库尔勒站	尉犁站	轮台站	和静站	和硕站	焉耆站	合计
降雨	522	243	547	204	246	396	2158
降雪	897	634	706	912	1118	1174	5441
雨夹雪	44	15	43	24	28	22	176
雨转雪	31	19	34	18	22	38	162
合计	1494	911	1330	1158	1414	1630	7937

间刚好发生在08:00或者20:00,则统计该时刻各层的温度,当不在08:00和20:00观测整点时,以就近原则选取,若更接近08:00,选取08:00探空数据,若更接近20:00,选取20:00探空数据,雨夹雪转雪天气以雨夹雪开始时间按照就近原则选取探空数据,雪转雨夹雪天气以雨夹雪结束时间按照就近原则选取探空数据,雨转雪天气时间根据降雨开始时间按照就近原则选取探空数据。

地面温度选取:出现降雨、降雪、雨夹雪、雨转雪天气现象时,若出现在观测时次(每天8次整点观测),选取该时次的地面最低温度,当不在观测时次时,以就近原则选取该时次的地面最低温度。

近年来"箱线图"在天气气候资料统计中得到较好应用,可以描述一组数据分布的分散程度[18]。本研究中的箱线图,长方框箱体代表50%降水样本分布范围,长方框的上下底分别为75%分位数和25%分位数,方框中的粗线表示50%降水样本的值。在对比分析中,若箱体之间互相没有交叉,表明两组数据的分布未出现重叠,区分度较好,可以较好判别降水相态;若箱体之间互相交叉,表明两组数据有重叠,不能判别降水相态,若箱体之间交叉很小,可取一种相态的75%相位作为另一种相态的25%相位。

2　结果与分析

2.1　不同相态降水的气候特征

图2分别给出了巴州北部冬半年不同降水相态出现频率月分布。库尔勒站、和静站、轮台站、和硕站、尉犁站和焉耆站降雪相态分别占总降水频次的60.0%、78.8%、53.1%、79.1%、69.6%和72.0%,降雨相态分别占总降水频次的34.9%、17.6%、41.1%、17.4%、26.7%和24.3%,雨夹雪分别占3.0%、2.1%、3.2%、2.0%、1.6%和1.4%,雨转雪分别占2.1%、1.5%、2.6%、1.5%、2.1%和2.3%,通过对比发现,巴州北部冬半年的降水相态主要以降雪为主。降水相态的月分布与温度分布相一致,10月以后温度逐渐下降,降雨天气逐步减少;11月温度处于零上向零下的过渡阶段,容易产生雨夹雪和雨转雪天气;12月至1月,由于温度较低,降水主要以降雪为主,降雨、雨夹雪和雨转雪很少发生;2月底至3月,温度逐渐回升,由零下向零上过渡,也易产生雨夹雪和雨转雪天气;4月天气转暖,降雨明显增多,降雪很少出现。因此巴州北部在10月和4月以降雨为主,12月和1月以降雪为主,11月和3月以雨夹雪和雨转雪为主。

2.2　识别判据的统计特征

2.2.1　高空各层温度与相态的特征分析　图3给出了库尉轮平原(图3a、c、e)和焉耆盆地(图3b、d、f)4种降水相态的高空温度箱线图。在库尉轮平原,500 hPa温度(T_{500})和700 hPa温度(T_{700})中,降雨与其他相态箱体无交叉,可判别降雨的相态,T_{500}>−22.7 ℃、T_{700}>−5.8 ℃时为降雨。850 hPa温度(T_{850})和近地层温度($T_{近地层}$,探空气球升空采集到的第一个温度数据)中,T_{850}和$T_{近地层}$的4个降水相态的箱体均无交叉,可完全判别4个相态,T_{850}>4.9 ℃、$T_{近地层}$>8.3 ℃为降雨;T_{850}<−7.3 ℃、$T_{近地层}$<−4.1 ℃为降雪;−3.0 ℃<T_{850}<−0.7 ℃、0.9 ℃<$T_{近地层}$<4.2 ℃为雨夹雪;−0.9 ℃<T_{850}<3.8 ℃、4.5 ℃<$T_{近地层}$<7.9 ℃为雨转雪。在焉耆盆地,T_{500}和T_{700}可判别降雨、雨转雪2个相态,T_{500}>−22.5 ℃、T_{700}>−4.8 ℃为降雨,T_{500}在−23.3~−22.5 ℃之间、T_{700}在−6.6~−5.0 ℃之间为雨转雪;T_{850}和$T_{近地层}$也可完全判别4个相态,T_{850}>6.8 ℃、$T_{近地层}$>10.3 ℃为降雨,T_{850}<−6.7 ℃、$T_{近地层}$<−4.6 ℃为降雪,−0.6 ℃<T_{850}<2.7 ℃、3.1 ℃<$T_{近地层}$<5.7 ℃为雨夹雪,

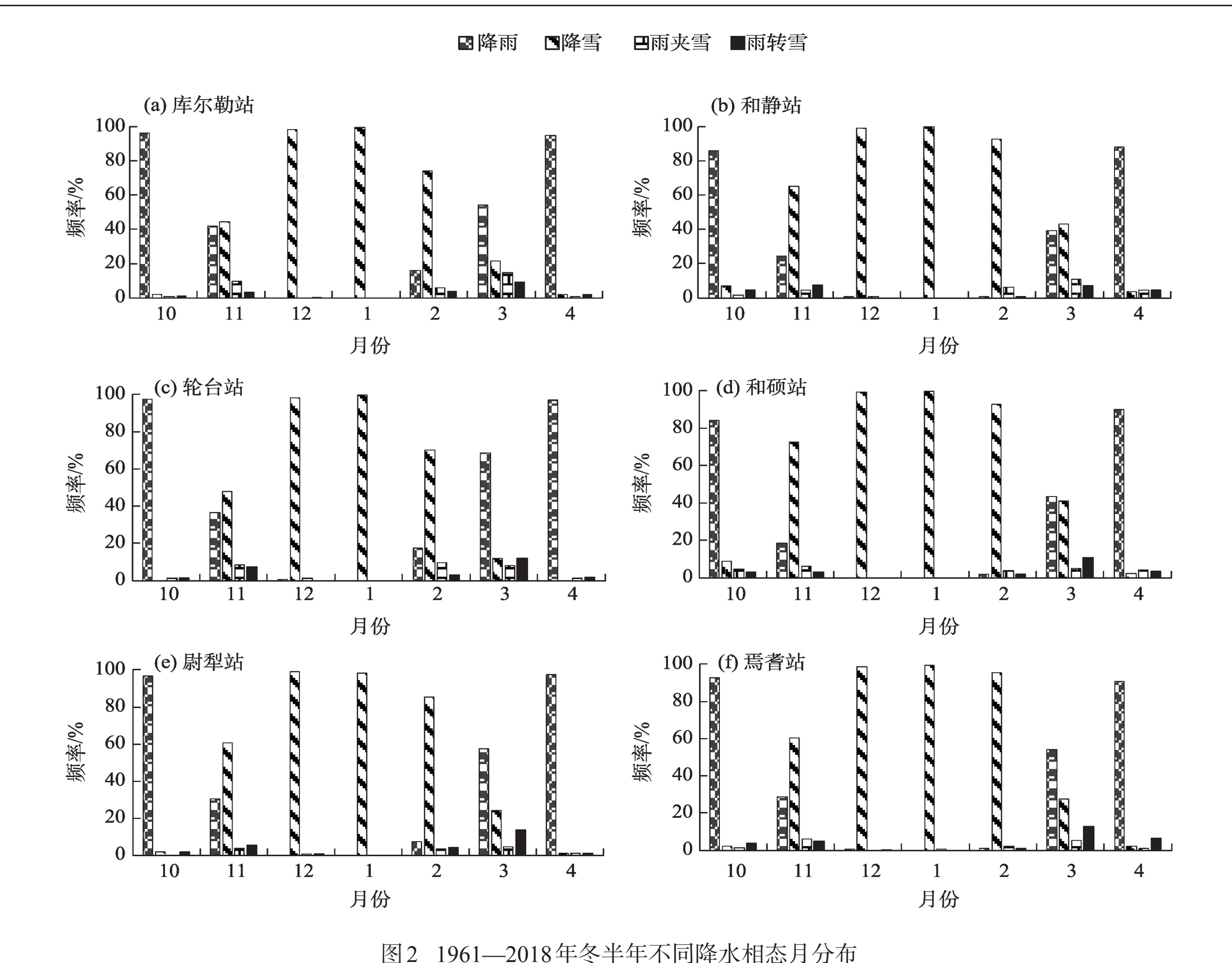


图2 1961—2018年冬半年不同降水相态月分布

Fig. 2 Monthly distributions of different precipitation types in winter half year from 1961 to 2018

3.2 ℃< T_{850} <5.1 ℃、5.7 ℃< $T_{近地层}$ <9.6 ℃为雨转雪。通过分析高空各层温度可知，$T_{近地层}$ 和 T_{850} 在2地区判别效果最好，也凝练出了各相态的温度阈值。

2.2.2 零度层高度与降水相态特征分析 0 ℃是降水相态转换的一个重要临界指标，也是我们判别降水相态的重要参考要素[19-20]，但并不是所有的降雪相态都发生在0 ℃层高度(H_0)。根据统计可知，库尉轮平原为降雨时，H_0>2157.5 m，H_0 在1419.8~2028.3 m之间为雨转雪，随着 H_0 的降低，相态逐渐转为雨夹雪、降雪，当 H_0<1371.0 m时，为降雪和雨夹雪，但出现降雪的概率更大(图4a)。焉耆盆地的降雨、降雪、雨夹雪相态的箱体未交叉，雨夹雪的75%相位1952.5 m与雨转雪25%相位1949.5 m有很小的交叉，可取1952.5 m为雨转雪下限值，可将4种相态完全判别，即 H_0>2429.3 m时为降雨，H_0<1377.8 m时为降雪，1431.3 m< H_0 <1952.5 m时为雨夹雪，1952.5 m< H_0 <2299.0 m时为雨转雪(图4b)。

2.2.3 地面温度与降水相态特征分析 图5给出了库尉轮平原和焉耆盆地4种降水相态的地面最低温度(T_{min})箱线图。库尉轮平原4种降水相态箱体互相均未有交叉(图5a)，因此 T_{min} 可判别4种降水相态，T_{min}>0.9 ℃为降雨，T_{min}<−7.7 ℃为降雪，−4.5 ℃< T_{min} <0.1 ℃为雨夹雪，0.3 ℃< T_{min} <0.8 ℃为雨转雪。图5b可看出，雨夹雪75%相位0 ℃与雨转雪25%相位−0.3 ℃有小交叉，可取0 ℃为雨转雪的下限，雨的25%相位0.8 ℃与雨转雪75%相位1.2 ℃有小交叉，可取0.8 ℃为雨转雪的上限。因此，T_{min}>0.8 ℃时为降雨，T_{min}<−7.8 ℃时为降雪，−2.5 ℃< T_{min} <0 ℃时为雨夹雪，0 ℃< T_{min} <0.8 ℃时为雨转雪。可见，T_{min} 也可将2地区的4种降水相态完全区分。

2.2.4 位势厚度与降水相态的统计特征 根据静力学方程可知，气压层之间的厚度可体现出气压层之间大气的整体冷暖情况，所以，两层间的位势厚度也常常被用来建立降水相态的预报指标，即通过比

图3　4种降水相态对应的温度箱线图

Fig. 3　Box-whiskey of four precipitation types responding to temperature

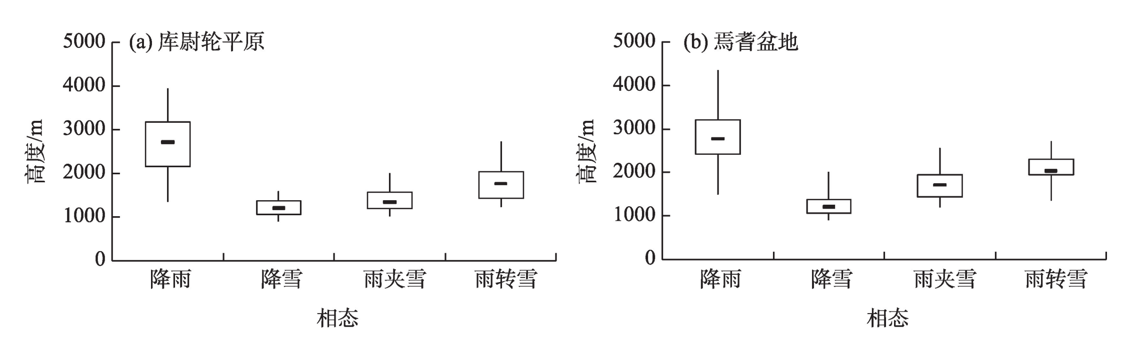


图4　4种降水相态对应的0 ℃高度箱线图

Fig. 4　Box-whiskey of four precipitation types responding to the height with 0 ℃

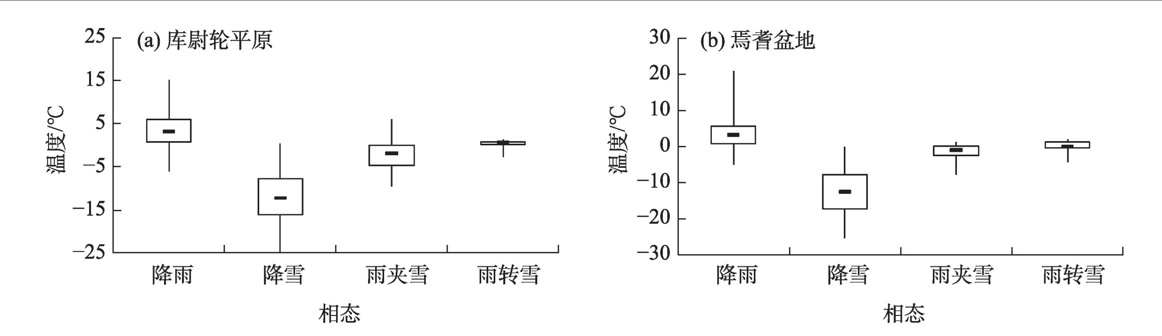
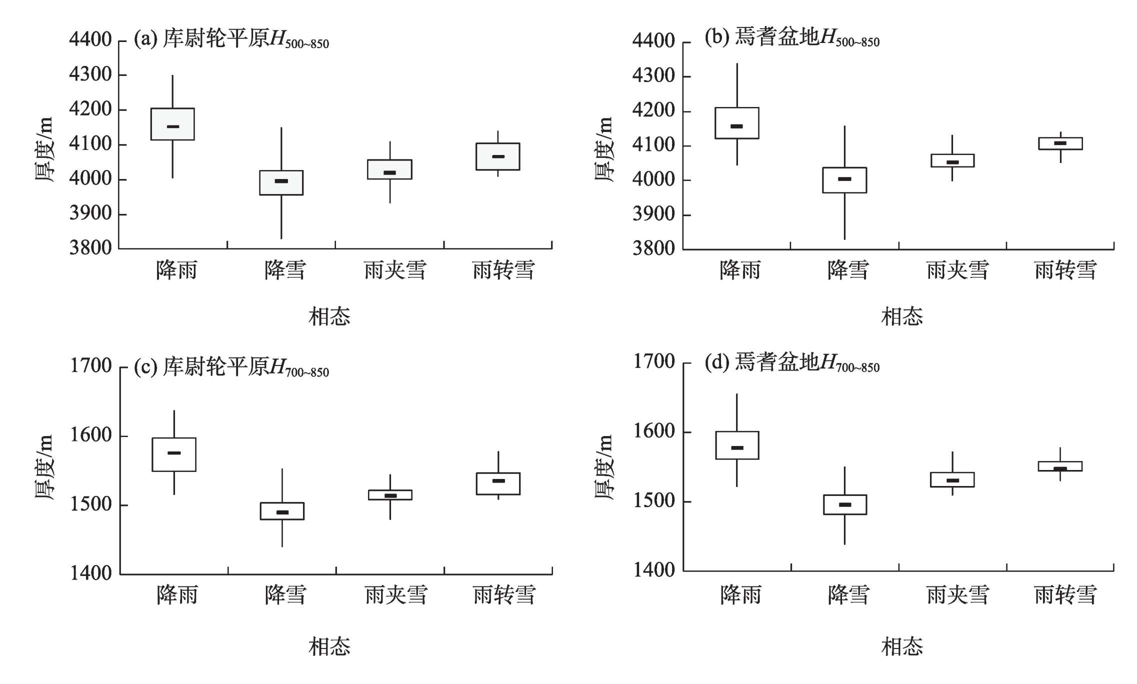


图5 4种降水相态对应的地面最低温度箱线图

Fig. 5 Box-whiskey of four precipitation types responding to the surface lowest temperature



注:$H_{500\sim850}$为500~850 hPa之间的位势厚度;$H_{700\sim850}$为700~850 hPa之间的位势厚度。下同。

图6 4种降水相态对应的厚度箱线图

Fig. 6 Box-whiskey of four precipitation types responding to thicknesses

较这些厚度可得出降水类型的阈值以提供不同相态降水的信息[21-22]。在库尉轮平原,500~850 hPa之间的位势厚度($H_{500\sim850}$)箱线图中的降雨、降雪、雨转雪的箱体没有交叉(图6a),可判别降雨、降雪和雨转雪,因此$H_{500\sim850}$>4114.0 m时为降雨,$H_{500\sim850}$<4026.0 m时为降雪,4028.5 m<$H_{500\sim850}$<4106.0 m时为雨转雪;700~850 hPa之间的位势厚度($H_{700\sim850}$)箱线图中降雨、降雪、雨夹雪箱体未交叉(图6c),而雨夹雪的75%相位1522.0 m和雨转雪的25%相位1515.8 m有小交叉,取1522.0 m为雨转雪下限值可将4种相态完全区分,$H_{700\sim850}$>1549.0 m时为降雨,$H_{700\sim850}$<1504.0 m时为降雪,1508.0 m<$H_{700\sim850}$<1522.0 m时为雨夹雪,1522.0 m<$H_{700\sim850}$<1546.5 m时为雨转雪。在焉耆盆地,4种降水相态在$H_{500\sim850}$(图6b)和$H_{700\sim850}$(图6d)中的箱体均未有交叉,因此$H_{500\sim850}$、$H_{700\sim850}$均可判别4种降水相态,$H_{500\sim850}$>4122.3 m时为降雨,$H_{500\sim850}$<4037.0 m时为降雪,4039.0 m<$H_{500\sim850}$<4075.0 m时为雨夹雪,4089.8 m<$H_{500\sim850}$<4122.3 m时为雨转雪;$H_{700\sim850}$>1561.0 m时为降雨,$H_{700\sim850}$<1509.8 m时为降雪,1522.0 m<$H_{700\sim850}$<1542.0 m时为雨夹雪,1544.3 m<$H_{700\sim850}$<1557.5 m时为雨转雪。可见$H_{500\sim850}$、$H_{700\sim850}$也可将2地区4种降水相态较好的区分。

2.2.5 特性层温差与降水相态的统计特征 在实际的大气中,由于逆温的存在导致了特征层温度的变化,在相态判断中易出现失误,特性层的温差可以

较好地消除逆温对判别降水相态带来的误差。在库尉轮平原，$T_{500\sim850}$（图7a）和$T_{700\sim850}$（图7c）的降雨、降雪、雨夹雪相态的箱体没有交叉，可判别此3种相态，因此$T_{500\sim850}$<−27.7 ℃时为降雨，$T_{500\sim850}$>−21.1 ℃时为降雪，−26.6 ℃<$T_{500\sim850}$<−23.1 ℃时为雨夹雪；$T_{700\sim850}$<−11.0 ℃时为降雨，$T_{700\sim850}$>−7.2 ℃时为降雪，−11.3 ℃<$T_{700\sim850}$<−8.4 ℃时为雨夹雪。在焉耆盆地，降雨的75%相位−28.4 ℃与雨夹雪的25%相位−29.4 ℃有小交叉（图7b），可取−28.4 ℃为雨夹雪的下限将3种相态区分，$T_{500\sim850}$<−28.4 ℃时为降雨，$T_{500\sim850}$>−21.1 ℃时为降雪，−28.4 ℃<$T_{500\sim850}$<−25.3 ℃时为雨夹雪；从图7d中可知，$T_{700\sim850}$中降雨、降雪、雨夹雪相态的箱体没有交叉，可判别此3种相态，$T_{700\sim850}$<−11.3 ℃时为降雨，$T_{700\sim850}$>−6.5 ℃时为降雪，−11.3 ℃<$T_{700\sim850}$<−8.7 ℃时为雨夹雪。可见，$T_{500\sim850}$、$T_{700\sim850}$可将2地区的降雨、降雪、雨夹雪区分，

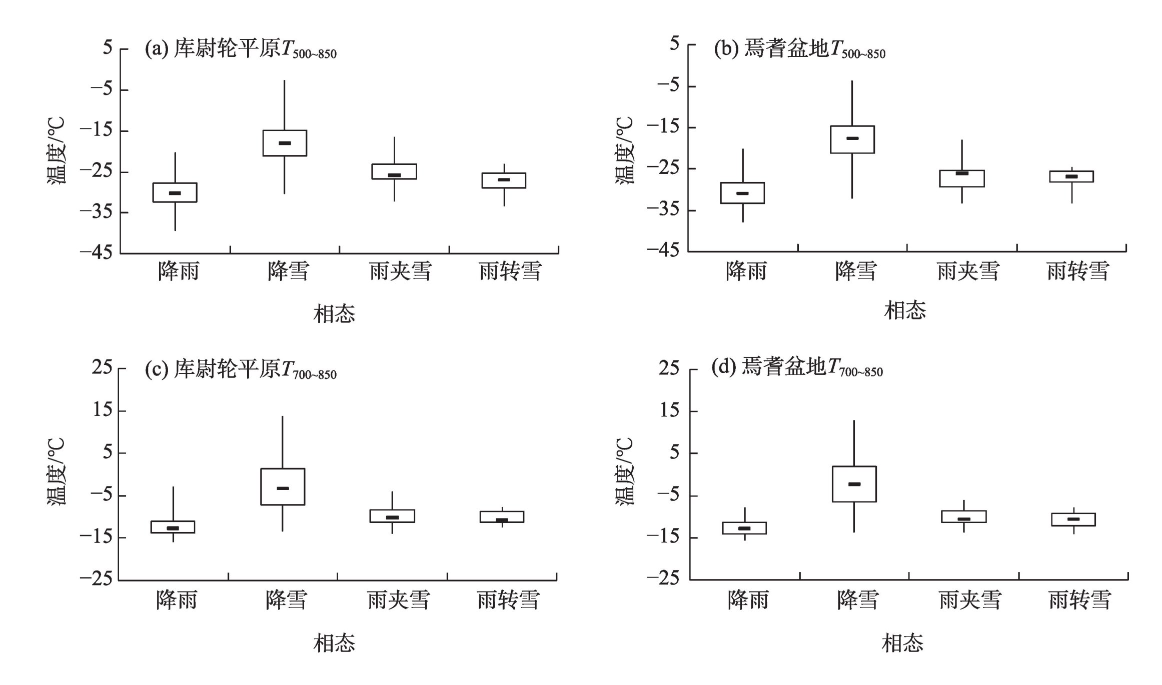


图7 4种降水相态对应的温差箱线图

Fig. 7 Box-whiskey of four precipitation types responding to temperature difference

表2 2地区不同降水相态综合识别判据

Tab. 2 Comprehensive identification criterion for different precipitation types of the two area

判据	库尉轮平原				焉耆盆地			
	降雨	降雪	雨夹雪	雨转雪	降雨	降雪	雨夹雪	雨转雪
T_{500}/℃	>−22.7	<−24.7	–	–	>−22.5	<−24.1	–	−23.3~−22.5
T_{700}/℃	>−5.8	<−9.1	–	–	>−4.8	<−7.9	–	−6.6~−5.0
T_{850}/℃	>4.9	<−7.3	−3.0~−0.7	−0.9~3.8	>6.8	<−6.7	−0.6~2.7	3.2~5.1
$T_{近地层}$/℃	>8.3	<−4.1	0.9~4.2	4.5~7.9	>10.3	<−4.6	3.1~5.7	5.7~9.6
T_{min}/℃	>0.9	<−7.7	−4.5~0.1	0.3~0.8	>0.8	<−7.8	−2.5~0.0	0.0~0.8
$T_{500\sim850}$/℃	<−27.7	>−21.1	−26.6~−23.1	–	<−28.4	>−21.1	−28.4~−25.3	–
$T_{700\sim850}$/℃	<−11.0	>−7.2	−11.3~−8.4	–	<−11.3	>−6.5	−11.3~−8.7	–
H_0/m	>2157.5	<1371.0	–	1419.8~2028.3	>2429.3	<1377.8	1431.3~1952.5	1952.5~2299.0
$H_{500\sim850}$/m	>4114.0	<4026.0	–	4028.5~4106.0	>4122.3	<4037.0	4039.0~4075.0	4089.8~4122.3
$H_{700\sim850}$/m	>1549.0	<1504.0	1508.0~1522.0	1522.0~1546.5	>1561.0	<1509.8	1522.0~1542.0	1544.3~1557.5

注：T_{500}为500 hPa温度；T_{700}为700 hPa温度；T_{850}为850 hPa温度；$T_{近地层}$为近地层温度；T_{min}为地面最低温度；$T_{500\sim850}$为500~850 hPa之间的温差；$T_{700\sim850}$为700~850 hPa之间的温差；H_0为0 ℃层高度；$H_{500\sim850}$为500~850 hPa之间的位势厚度；$H_{700\sim850}$为700~850 hPa之间的位势厚度。

不能区分雨转雪，但仍有一定的指示意义。

2.3 降水相态综合识别判据及检验

2.3.1 降水相态综合识别判据 表2给出了2地区的降水相态综合识别判据，可以看出在各层温度指标中，T_{min}、$T_{近地层}$、T_{850}可以较好地判别4种降水相态，T_{700}和T_{500}只能判别降雨、降雪，在焉耆盆地可判别雨转雪，T_{min}、$T_{近地层}$、T_{850}判别降水相态的效果明显好于T_{700}和T_{500}，表明随着高度的升高，气温区分相态的能力有所下降，但T_{700}和T_{500}在实际业务中仍有较好的参考价值。特性层的温差和厚度可以降低逆温对降水相态判别时带来的误差，$T_{500-850}$、$T_{700-850}$均能将降雨、降雪、雨夹雪3个降水相态区分开来，但不能区分雨转雪，H_0、$H_{500-850}$、$H_{700-850}$除库尉轮平原雨夹雪外，可以较好地判别4种降水相态。

2.3.2 降水相态判据的检验 选取2019—2021年10月至次年4月的187个降水个例对识别判据进行检验，由于T_{500}和T_{700}温度指标区分相态能力不足，不作为检验指标，综合指标中降雨、降雪、雨夹雪相态以表2中其余8个指标满足4个及以上判定为正确，雨转雪相态满足3个及以上指标为正确。对8个物理量指标的评价采用两种原则：一是无空报原则，即100%判断出某种降水相态；二是不漏报原则，评价采用TS评分方法[23]，$TS=H/(F+O-H)$，其中F为预报对应相态的降水次数，O为观测到对应相态的降水次数，H为预报对应相态降水且预报准确的次数，如果以不漏报为原则，那么$O=H$，则$TS=H/F$，作为特例，记为TS_0[24]。由表3可见，在库尉轮平原和焉耆盆地，T_{850}、H_0、T_{min}、$T_{近地层}$分别对降雨、降雪、雨夹雪、雨转雪的预报效果最好，在2地区的准确率分别达到了92.50%、100.00%、100.00%、100.00%和94.12%、98.80%、66.67%、75.00%。特性层温度及温差对降雨和降雪的预报效果要好于雨夹雪，位势高度及厚度的判据对降雪的预报效果好于降雨和雨夹雪，位势厚度判别雨转雪要好于特性层温度。从每个物理量的综合准确率来看，由于低层受逆温的影响，T_{850}的综合评分最低为63.17%，H_0与$T_{700-850}$的综合评分较高且相当，分别为85.79%和86.67%，其余物理量判据综合评分在72.22%~77.54%，均达到了较好水平。从综合指标来看，2地区的综合指标准确率达到了92.06%和94.36%，降雨、降雪判定准确率分别为92.50%和100.00%、91.18%和98.80%，识别效果最好，雨夹雪、雨转雪判定准确率分别为75.00%和66.67%、33.33%和75.00%，在实际中有参考价值。对2地区满足相应指标进行综合判定后，预报综合评分达到了93.58%，较单独物理量评分有明显的提高。

3 讨论

国内最新研究[11-16]大都用特性层的温度和位势厚度判别降水相态，虽然研究区域不同，但从温度判据来看，低层、近地层的温度指标整体较好，特别是T_{850}表现最好，而高层温度指标较差，从位势高度及厚度来看，0 ℃层高度、中高层与低层的位势厚度也具有很好的一致性，与本研究得出的气象因子类似，但由于海拔高度的不同，降水相态的指标有明显不同，本研究降雨的T_{850}较张琳娜等[13]、王洪霞等[11]、孙燕等[22]低海拔地区偏高8 ℃，降雪的T_{850}偏低4 ℃，降雨和降雪的0 ℃层高度较任兆鹏等[25]、张丽等[26]研

表3 8个物理量4种相态评分检验准确率

Tab. 3 Testing accuracy of four precipitation types for eight physical quantities /%

物理量	库尉轮平原					焉耆盆地					综合评分
	降雨	降雪	雨夹雪	雨转雪	综合	降雨	降雪	雨夹雪	雨转雪	综合	(TS_0)
$T_{近地层}$	70.00	68.75	50.00	100.00	69.84	85.29	81.93	33.33	75.00	81.45	77.54
T_{850}	92.50	37.50	25.00	66.67	73.02	94.12	46.99	33.33	25.00	59.68	63.17
T_{min}	95.00	56.25	100.00	33.33	82.54	91.18	66.27	66.67	25.00	71.77	75.41
$T_{500-850}$	77.50	68.75	50.00	–	73.33	85.30	67.47	33.33	–	71.67	72.22
$T_{700-850}$	92.50	75.00	50.00	–	85.00	85.30	89.16	66.67	–	87.50	86.67
H_0	67.50	100.00	25.00	–	73.33	82.35	98.80	33.33	50.00	91.13	85.79
$H_{500-850}$	60.00	100.00	25.00	66.67	68.25	88.24	80.72	33.33	50.00	81.45	77.01
$H_{700-850}$	80.00	81.25	25.00	100.00	77.78	94.12	68.67	33.33	50.00	75.00	75.94
综合指标	92.50	100.00	75.00	66.67	92.06	91.18	98.80	33.33	75.00	94.36	93.58

究结果明显偏高。

降水相态综合判据中，焉耆盆地4种相同降水相态的高空各层温度、0 ℃层高度、位势厚度的临界值是高于库尉轮平原，这与焉耆盆地的地形、海拔有一定关系，由于焉耆盆地纬度偏北、海拔高度更高，冷空气影响更频繁，高空温度更易降温，因此当焉耆盆地降水相态为降雪时，库尉轮平原可能为降雨，而当2地出现相同降水相态时，焉耆盆地高空各层温度、0 ℃层高度要高于库尉轮平原。

本文的研究结果适用于巴州北部的平原地区，不能判别巴州北部浅山区和高山区的降水相态变化，利用高空规定层的要素来判识山区的降水相态变化仍需进一步研究。

4 结论

（1）通过统计分析1961—2018年10月至次年4月新疆巴州北部代表站降水气候资料，得出巴州北部在10月和4月以降雨为主，12月和1月以降雪为主，雨夹雪和雨转雪主要发生在11月和3月。

（2）利用2003—2018年10月至次年4月库尔勒站探空资料，得到与降水相态转换关系密切的10种物理量：T_{min}、$T_{近地层}$、T_{850}、T_{700}、T_{500}、$T_{500\sim850}$、$T_{700\sim850}$、$H_{500\sim850}$、$H_{700\sim850}$、H_0。

（3）T_{min}、$T_{近地层}$、T_{850}、H_0、$H_{500\sim850}$、$H_{700\sim850}$可较好的判别4种降水相态，$T_{500\sim850}$、$T_{700\sim850}$能将降雨、降雪、雨夹雪3种降水相态区分开来，对于库尉轮平原而言，T_{min}、$T_{近地层}$、T_{850}、$H_{700\sim850}$指标效果最好，对于焉耆盆地而言，T_{min}、$T_{近地层}$、T_{850}、H_0、$H_{500\sim850}$、$H_{700\sim850}$效果最好。特性层的温差和厚度可以降低逆温对降水相态判别带来的误差。

（4）通过定量细化4种降水相态特征和阈值指标，对降水相态识别判据进行检验，库尉轮平原和焉耆盆地综合指标准确率分别为92.06%和94.36%，综合评分达到了93.58%，且特性层温度及温差对降雨和降雪的预报效果要好于雨夹雪，位势高度及厚度的判据对降雪的预报效果好于降雨和雨夹雪，位势厚度判别雨转雪要好于特性层温度，对巴州北部降水相态的判别有很好的参考价值。

（5）新疆巴州北部库尉轮平原与焉耆盆地之间的气候有明显的差异，降水相态转换是一个频繁复杂的动态过程，预报员主观预报其相态转换的难度和挑战极大，上述降水相态的综合判据可为巴州北部冬半年降水相态的客观预报提供科学依据。

参考文献（References）

[1] 田亚林, 李雪梅, 李珍, 等. 1980—2017年天山山区不同降水形态的时空变化[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 308-318. [Tian Yalin, Li Xuemei, Li Zhen, et al. Spatial and temporal variations of different precipitation types in the Tianshan Mountains from 1980 to 2017[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 308-318.]

[2] 刘梅, 俞剑蔚, 蒋义芳, 等. 2020年3月28日沿江和苏南突发降雪多源监测特征及成因分析[J]. 气象, 2021, 47(10): 1169-1181. [Liu Mei, Yu Jianwei, Jiang Yifang, et al. Multi-source monitoring characteristics and causes of abrupt snowfall in southern Jiangsu on 28 March 2020[J]. Meteorological Monthly, 2021, 47(10): 1169-1181.]

[3] 孙继松, 梁丰, 陈敏, 等. 北京地区一次小雪天气过程造成路面交通严重受阻的成因分析[J]. 大气科学, 2003, 27(6): 1057-1066. [Sun Jisong, Liang Feng, Chen Min, et al. An analysis on serious city traffic trouble caused by light snow[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(6): 1057-1066.]

[4] 龙柯吉, 王佳津, 郭旭, 等. 四川省降水相态识别判据研究[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(3): 57-65. [Long Keji, Wang Jiajin, Guo Xu, et al. Research on discrimination criterion of precipitation types in Sichuan Province[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2016, 36(3): 57-65.]

[5] Pierre B. A method to determine precipitation types[J]. Weather and Forecasting, 2000, 15(5): 583-592.

[6] Heppner, Paul O G. Snow versus rain: Looking beyond the “Magic” numbers[J]. Weather and Forecasting, 1992, 7(4): 683-691.

[7] Czys R R, Scott R W, Tang K C. A physically based, nondimensional parameter for discriminating between locations of freezing rain and ice pellets[J]. Weather and Forecasting, 1996, 11(4): 591-598.

[8] 李江波, 李根娥, 裴雨杰, 等. 一次春季强寒潮的降水相态变化分析[J]. 气象, 2009, 35(7): 87-94. [Li Jiangbo, Li Gen’e, Pei Yujie, et al. Analysis on the phase transformation of precipitation during a strong cold wave happened in spring[J]. Meteorological Monthly, 2009, 35(7): 87-94.]

[9] 高松影, 李慧琳, 宋丽丽, 等. 丹东冬季降水相态判据研究[J]. 气象与环境学报, 2014, 30(2): 38-44. [Gao Songying, Li Huilin, Song Lili, et al. Study on criteria for winter precipitation phase states in Dandong[J]. Journal of Meteorology Environment, 2014, 30(2): 38-44.]

[10] 漆梁波, 张瑛. 中国东部地区冬季降水相态的识别判据研究[J]. 气象, 2012, 38(1): 96-102. [Qi Liangbo, Zhang Ying. Research on winter precipitation types discrimination criterion in eastern China[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(1): 96-102.]

[11] 王洪霞, 苗爱梅, 董春卿, 等. 山西一次春季降水过程相态变化的成因分析[J]. 高原气象, 2013, 32(6): 1787-1794. [Wang Hon-

gxia, Miao Aimei, Dong Chunqing, et al. Cause analysis on the phase transformation of precipitation in Shanxi in spring[J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(6): 1787−1794.]

[12] 高婧, 杨涛, 李海燕, 等. 近60 a新疆塔城地区不同相态降水时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1347-1356. [Gao Jing, Yang Tao, Li Haiyan, et al. Temporal and spatial variation of different precipitation types in Tacheng area of Xinjiang in recent 60 years[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1347-1356.]

[13] 张琳娜, 郭锐, 曾剑, 等. 北京地区冬季降水相态的识别判据研究[J]. 高原气象, 2013, 32(6): 1780−1786. [Zhang Linna, Guo Rui, Zeng Jian, et al. Research on winter precipitation types discrimination criterion in Beijing[J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(6): 1780−1786.]

[14] 许美玲, 梁红丽, 金少华, 等. 昆明冬季降水相态识别判据研究[J]. 气象, 2015, 41(4): 474−479. [Xu Meiling, Liang Hongli, Jin Shaohua, et al. Study on identification criterion for precipitation phase in winter Kunming[J]. Meteorological Monthly, 2015, 41(4): 474−479.]

[15] 张志杰, 王志楠. 呼和浩特市降水相态识别判据研究[J]. 内蒙古林业科技, 2017, 43(1): 42−47. [Zhang Zhijie, Wang Zhinan. Research on identification criterion of precipitation phase in Hohhot [J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2017, 43(1): 42−47.]

[16] 段云霞, 李得勤, 李大为, 等. 沈阳降水相态特征分析及预报方法[J]. 干旱气象, 2016, 34(1): 51−57. [Duan Yunxia, Li Deqin, Li Dawei, et al. Analysis on precipitation phase characteristics and its forecast methods of Shenyang[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(1): 51−57.]

[17] 张俊兰, 彭军. 北疆春季降水相态转换判识和成因分析[J]. 高原气象, 2017, 36(4): 939−949. [Zhang Junlan, Peng Jun. A forecast analysis of precipitation phase transformation and rainfall intensity in spring over northern Xinjiang[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(4): 939−949.]

[18] 杨贵名, 宗志平, 马学款. "方框−端须图"及其应用示例[J]. 气象, 2005, 31(3): 53−55. [Yang Guiming, Zong Zhiping, Ma Xuekuan. "Box-whiskey" and its application examples[J]. Meteorology Monthly, 2005, 31(3): 53−55.]

[19] 王焕毅, 张翘, 劝碧鸿, 等. 本溪冬半年降水相态的识别判据研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(22): 243−247. [Wang Huanyi, Zhang Qiao, Xiao Bihong, et al. Study on identification criterion of precipitation phase in winter-half-year in Benxi[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(22): 243−247.]

[20] 戴东新. 暴雪[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2014: 94−95. [Dai Dongxin. Blizzard[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Press, 2014: 94−95.]

[21] 杨成芳, 姜鹏, 张少林, 等. 山东冬半年降水相态的温度特征统计分析[J]. 气象, 2013, 39(3): 355−361. [Yang Chengfang, Jiang Peng, Zhang Shaolin, et al. Analysis on temperature of precipitation types in cold seasons in Shandong[J]. Meteorology Monthly, 2013, 39(3): 355−361.]

[22] 孙燕, 严文莲, 尹东屏, 等. 江苏冬季降水相态气候分布特征及预报方法探讨[J]. 气象科学, 2013, 33(3): 325−332. [Sun Yan, Yan Wenlian, Yin Dongping, et al. Climatic characteristics and forecast of precipitation phase in winter of Jiangsu[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2013, 33(3): 325−332.]

[23] 李延香. 1993年LAFS数值降水预报产品评价[J]. 应用气象学报, 1995, 6(3): 281−288. [Li Yanxiang. Verification of precipitation forecasts for 1993 from limited-area analysis forecast system [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 1995, 6(3): 281−288.]

[24] 隋玉秀, 杨景泰, 王建, 等. 大连地区冬季降水相态的预报方法初探[J]. 气象, 2015, 41(4): 464−473. [Sui Yuxiu, Yang Jingtai, Wang Jian, et al. Preliminary study about the forecasting of winter precipitation types in Dalian[J]. Meteorology Monthly, 2015, 41(4): 464−473.]

[25] 任兆鹏, 张苏平, 马艳, 等. 青岛冬半年降水相态统计分析及判别方法研究[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(1): 27−33. [Ren Zhaopeng, Zhang Suping, Ma Yan, et al. Statistical analysis and discrimination criterion on precipitation types of winter half year in Qingdao[J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(1): 27−33.]

[26] 张丽, 徐朋飞, 吴胜平, 等. 安庆市降水相态识别判据研究[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(1): 30−37. [Zhang Li, Xu Pengfei, Wu Shengping, et al. Analysis of identification criterion of precipitation phase in Anqing City[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2018, 34(1): 30−37.]

Meteorological factor characteristic and index of precipitation types during winter half year in northern Bayingol Prefecture of Xinjiang

QIU Huimin[1], WAN Yu[2], ZHANG Shiming[1], XIAO Lianyuan[3], ZHOU Xueying[1], WEN Chun[1], JIANG Jujin[4]

(1. Bayingol Prefecture Meteorological Bureau of Xinjiang, Korla 841000, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 3. Ruoqiang Meteorological Bureau of Xinjiang, Ruoqiang 841800, Xinjiang, China; 4. Korla Weather Modification Ofice of Xinjiang, Korla 841000, Xinjiang, China)

Abstract: Based on the weather phenomenon data from six national weather stations in northern Bayingol Prefecture of Xinjiang, China, the climatic characteristics of rain, snow, sleet, and rain to snow from October to April in the last 58 years (1961—2018) are analyzed. The results show that the major precipitation types in northern Bayingol Prefecture are rain in October and April, snow in December and January, and sleet and rain to snow mainly occur in November and March. The discrimination criterion and index of precipitation types are quantified using 10 physical variables closely related to the precipitation types transition discovered using sounding data from the Korla station from October 2003 to April 2018. The results show that: (1) Surface minimum temperature, near-surface air temperature, temperature at 850 hPa, geopotential thickness between 500 hPa and 850 hPa, geopotential thickness between 700 hPa and 850 hPa, and 0 ℃ level height can completely distinguish the four precipitation types, and the temperature difference between 500 hPa and 850 hPa, temperature difference between 700 hPa and 850 hPa can distinguish rain, snow, and sleet better. (2) A phase state scoring method for precipitation forecasts was developed, and after a thorough analysis, the combined index accuracy was 92.06% and 94.36% for Korla-Yuli-Luntai Plain and Yanqi Basin, respectively, and the forecast score was 93.58%. (3) The characteristic layer temperature and temperature difference forecast rain and snow with more accuracy than sleet, the geopotential height and thickness forecast snow with greater accuracy than rain and sleet, and the geopotential thickness forecast rain to snow with greater accuracy than the characteristic layer temperature. These comprehensive precipitation type indices have a high reference value for distinguishing precipitation types in northern Bayingol Prefecture and can provide a scientific foundation for improving rain-snow phase transition forecasting accuracy.

Key words: precipitation type; rain to snow; discrimination criterion; examination; northern Bayingol Prefecture